

**РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****В.С. Смородин, А.В. Клименко, Е.И. Сукач, О.А. Шимчик***Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины***RESTRUCTURING OF SIMULATION MODELS OF CONTROLLED SYSTEMS IN AUTOMATION OF PROJECT SIMULATION****V.S. Smorodin, A.V. Klimenko, E.I. Sukach, O.A. Shimchik***F. Scorina Gomel State University*

Предложен способ реструктуризации имитационных моделей вероятностных технологических процессов, имеющих управляющую систему, для решения многокритериальных задач оптимизации структуры управления при автоматизации проектного моделирования новых технологических объектов. Приведено теоретическое обоснование способа реструктуризации и технология его применения на основе адаптации структуры имитационной модели системы управления к условиям функционирования технологического цикла. Обоснована возможность использования предложенного подхода для оценки качества проектного моделирования при построении оптимальной структуры системы управления технологическим циклом производства.

**Ключевые слова:** автоматизация проектного моделирования, реструктуризация имитационных моделей, управляемые системы, многокритериальная задача оптимизации.

The process of restructuring of simulation models of probabilistic technological processes with a control system for solving multi-criteria optimization problems in the management structure of the automation of project modeling of new technological facilities is offered. The theoretical substantiation of a way of restructuring and technology of its application on the basis of the adaptation of the structure of the control system of a simulation model to the conditions of functioning of the technological cycle are shown. The ability to use the proposed approach for assessing the quality of project simulation in constructing optimal structure of the control system of the technological cycle of production is justified.

**Keywords:** automation of project simulation, restructuring simulation model, controlled systems, multi-criteria optimization problem.

**Введение**

При исследовании сложных технологических объектов часто приходится сталкиваться с недостаточной результативностью известных методов, в особенности, если дело касается проектирования, проектного моделирования или анализа функционирования, когда структура таких объектов изменяется в процессе их эволюции. Это связано, в первую очередь, с их многообразием и сложностью практических задач, которые возникают уже на стадии проектного моделирования, а также при оценке уровня надежности и безопасности потенциально опасных сложных технических систем [1].

В этой связи является актуальной разработка подхода к исследованию сложных систем на стадии автоматизации их проектного моделирования, который позволял бы учитывать изменение структурных связей управляющей системы при изменении структуры технологического цикла вероятностного технологического процесса производства.

В основу такого подхода может быть положена процедура проектного моделирования объекта исследования, опирающаяся на адаптируемую структуру имитационной модели системы управления, которая изменяется в процессе функционирования технологического цикла производства при

решении многокритериальных задач оптимизации управления.

Как известно, основной задачей эффективного управления технологическим циклом производства является реализация конкретной последовательности универсальных управляющих воздействий, позволяющих оптимизировать выходные параметры технологической системы при возможных изменениях структуры технологического цикла, которые могут возникнуть, например, в условиях наличия элементов потенциально опасного производства [2], в рамках решаемой многокритериальной задачи управления.

Проводимые в последнее время в этой области исследования показывают, что качественный анализ функционирования систем управления предполагает учет влияния огромного числа факторов, которые претерпевают изменения в процессе реализации функционирования объекта исследования, что, как известно, достигается средствами построения имитационных моделей исследуемых систем.

**1 Автоматизация проектного моделирования управляемых систем и решение многокритериальной задачи оптимизации управления**

Автоматизация проектного моделирования управляемых систем реализуется рядом этапов

создания, испытания и реализации имитационной модели системы управления (СУ) технологическим процессом производства (ТПП).

На *этапе 1* задается текущая структура СУ ТПП. Вначале формируется таблица параметров  $PR.SOST_{ij}$  и создается таблица коммутации процессов, в которой все элементы упорядочены по возрастанию номеров. Для отображения надежных характеристик оборудования задаются следующие матрицы: времени  $\|Q_{lr ij}\|$  наработки оборудования; функций  $\|F_{lij}(\tau)\|$  условного распределения времени пребывания технологического процесса в текущих состояниях; функций  $F_{2ij}(C)$  условного распределения стоимости выполнения технологических операций; вероятностей  $\|P_{av kj}\|$  возникновения аварий на оборудовании номера  $k$  в  $j$ -м состоянии; времени  $\|F_{3ij}(\tau_{BO})\|$  безотказной работы  $k$ -го устройства оборудования; длины интервала  $\|F_{4ij}(\tau_{VO})\|$  восстановления работоспособности оборудования с номером  $k$ ; интервалов времени  $\|F_{5ij}(\tau_{AV})\|$  ликвидации аварийной ситуации на устройстве в  $j$ -м состоянии технологического цикла производства.

На *этапе 2* организуется натурный эксперимент для получения исходной информации и последующей проверки адекватности имитационной модели текущей структуры управления реальному технологическому процессу производства. Для тех параметров, которые сложно получить в натурном эксперименте, используются экспертные оценки их значений. Основную трудность в подготовке исходной информации представляет определение вероятностных характеристик  $PR.SOST_{ij}$ . В случаях, когда не удается найти аналитический вид для аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления, которая стандартизована для всех типов параметров.

На *этапе 3* осуществляется запись параметров  $PR.SOST_{ij}$  в базу данных  $BDM$  имитационной модели системы управления. При каждой записи значений параметров происходит их преобразование во внутреннее представление, контроль корректности вводимых значений и вывод результатов контроля для устранения ошибок в описании структуры ТПП. Взаимодействие с пользователем осуществляется путём реализации диалога в режиме «вопрос-ответ».

На *этапе 4* таблицы коммутации  $PR.SOST_{ij}$  с  $PR.UZEL_j$  проверяются на соответствие входов и выходов математических моделей компонентов структуры управления. Любое дублирование информации фиксируется с выдачей соответствующего сообщения на экран монитора. По окончании

этапа 4 выдаётся структура таблиц коммутации, в которой отсутствуют синтаксические ошибки описания модели.

На *этапе 5* происходит инициализация и верификация базового варианта имитационной модели (ИМ) системы управления. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и оборудования ТПП, указываются условия окончания имитации, число реализаций процедуры Монте-Карло, проводится начальный запуск имитации базового варианта имитационной модели.

На *этапе 6* осуществляется испытание и исследование имитационной модели. Шаги данного этапа стандартизованы на основе известных методик испытания ИМ сложных систем: вначале оценивается ошибка имитации ( $\varepsilon\%$ ), представляющая собой максимальный процент ошибок откликов модели; определяется длина переходного периода имитации ( $T_s$ ), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех остальных переходит в установившееся состояние. Следующим шагом испытаний является проверка «чувствительности» откликов к изменениям параметров моделирования. Каждая составляющая вектора параметров модели ( $X_k$ ) изменяется в диапазоне от минимального ( $X_k^-$ ) до максимального ( $X_k^+$ ) значений, а остальные компоненты вектора параметров  $X_r$  устанавливаются в середине интервала ( $X_r^0$ ). Определяется приращение компонентов вектора откликов  $\Delta Y_h\%$  и проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов меньше  $\varepsilon\%$ , то считают что имитационная модель не «чувствительна» к вариациям вектора параметров. Те параметры  $X_r$ , которые оказались не «чувствительными», можно в дальнейшем исследовании исключить. Последним шагом этапа испытания является проверка адекватности модели: сравниваются средние значения откликов модели с параметрами реальной системы управления. При этом используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений  $h$ -го отклика имитационной модели и реального технологического процесса производства, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента.

На *этапе 7* организуется серия многопрогонных имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый имитационный эксперимент (ИЭ) представляет  $l$ -ю реализацию имитационной модели. При завершении  $N$  прогонов имитационной модели в базе данных будут сформированы выборки статистик  $l$ -х реализаций. После проведения  $N$  опытов на имитационной модели из статистик имитации вычисляются отклики модели.

На *этапе* 8 с помощью подсистемы *PS.OBRABOT* из выборок, хранящихся в базе данных, формируются графики и диаграммы, определяются математические ожидания и дисперсии откликов имитации. Откликами имитационной модели являются усредненные по всем реализациям время и стоимость нахождения системы управления технологическим процессом в  $j$ -х состояниях

$$T_j^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{lj}; \quad C_j^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N C_{lj}$$

а также общие значения времени восстановления и ликвидации аварий в процессе его реализации

$$T_{VO} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{VOlj}; \quad T_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{AVlj}.$$

Цель имитации состоит в минимизации значений компонентов вектора  $(T, C, T_{VO}, T_{AV})$ , при которой лучшим признается вариант организации структуры управления технологическим циклом, доставляющий минимум  $\Psi_0$  значению целевого функционала  $\Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV})$ :

$$\Psi_0 = \min \Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV}).$$

После усреднения результатов имитации в соответствии с процедурой метода Монте-Карло в виде графиков и диаграмм формируются интегральные статистики имитации.

С помощью подсистемы *PS.VIZUAL* графики и диаграммы выдаются на печать.

На *этапе* 9 диаграммы использования ресурсов сопоставляются в едином масштабе изменения модельного времени. По этим графикам и временным диаграммам определяются диапазоны расхода ресурсов ТПП при реализации текущей структуры системы управления. Результатом сопоставления является отбраковка тех режимов управления, которые требуют много ресурсов для своей реализации.

Наконец, на *этапе* 10, с помощью подсистемы *PS.RESHEN* анализируются варианты организации структуры управления технологическим циклом для принятия обоснованного решения при реализации соответствующих задач проектного моделирования.

## 2 Реструктуризация имитационных моделей управляемых систем

В основу описания математического аппарата, используемого при реструктуризации имитационных моделей управляемой системы, положена возможность возникновения отказов оборудования при выполнении агрегатов-имитаторов технологических операций, что ставит эксперта-технолога перед необходимостью на стадии проектирования предусмотреть выход из состояний, возникших после реализации аварии. На этот случай в имитационной модели предусматриваются «резервные» цепочки технологических

операций  $AMTXO_{ij}$ , которые активизируются только при появлении аварий. Переключение на «резервную» ветвь реализуется за счёт использования булевой матрицы коммутации  $\|\gamma_{ns}\|$ , формируемой экспертом-технологом до начала имитации. Строками этой матрицы ( $n$ ) являются номера агрегатов  $AMTXO_{ij}$  на входе агрегата-события  $ASOB_i$ , а столбцами ( $S$ ) являются номера резервных  $AMTXO_{ij}$  на выходе  $ASOB_j$ , которые необходимо инициировать в поставарийной ситуации. Подобное «технологическое резервирование» является динамическим регулятором поставарийной ситуации, возникшей при реализации текущей структуры системы управления моделируемым объектом.

Другим способом недопущения аварий оборудования является автоматический переход на резервные устройства, когда хотя бы для одного из устройств оборудования фактическая «наработка» превышает пороговые значения из множества  $\{ind_r\}$ . Элементы этого множества  $\{ind_r\}$  поступают в подсистему *PS.OPEREX*, которая проверяет близость к пороговому значению наработки всех устройств оборудования. При достижении близости к пороговым значениям у нескольких устройств формируются автоматические воздействия на систему управления ИМ: групповой переход на резервирование тех устройств, у которых наработка близка к критической ( $\alpha_1$ ); переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств ( $\alpha_2$ ); допускается возможность аварии в тех случаях, когда процесс производства останавливать нельзя, и состояния индикаторов игнорируются ( $\alpha_3$ ).

Подсистема *PS.ANALEX* использует статистику имитаций  $\{ST_k\}$  и множество откликов модели  $\{Y_{0j}\}$ . Откликами  $Y_{0j}$  являются усреднённые по числу реализаций  $N$  их интегральные значения для  $h$ -го варианта управляемой производственной системы: критическое время выполнения ( $T_{KPh}$ ) технологического цикла производства, стоимость его реализации ( $C_{0h}$ ), интегральный расход материалов и комплектующих изделий ( $mt_{oh}$ ), количество использованных ресурсов  $r$ -го номера ( $v_{\Sigma rh}$ ), суммарная стоимость ликвидации аварий ( $C_{ABh}$ ), общие потери времени на профилактику ( $T_{OPh}$ ). Интегральные отклики модели составляют многомерный вектор откликов  $V_{OH}$  варианта структуры системы

управления, у которого все компоненты подлежат минимизации, но имеют различную размерность и диапазоны изменения. Для сравнения вариантов структуры осуществляется «свёртка» этого вектора к скалярному показателю  $W_h$  способом весовых коэффициентов важности ( $\sum_j \delta_j = 1$ ;  $0 \leq \delta_j \leq 1$ ) откликов с номером  $j$ . Вариантам организации структуры управляемой производственной системы соответствуют значения вектора параметров  $\{X_{0jh}\}$  и постоянных параметров имитации множества  $\{G_h\}$ . Общее количество вариантов  $N_h$  ( $h = \overline{1, K_0}$ ) определяется стратегией изменения каждого уровня параметров.

Выбор оптимальной стратегии осуществляется на основе классических методов планирования экспериментов. Решением задачи построения оптимального варианта организации структуры системы управления технологическим циклом производства является минимальное значение  $W_h$  по всему множеству вариантов с номером  $h$ .

### 3 Динамическая имитация при автоматизации проектного моделирования систем управления

Динамическая имитация при автоматизации проектного моделирования систем управления осуществляется на основе построения компонентов динамической имитационной модели, при котором исходная структура управления технологическим объектом представляется конечным набором взаимосвязанных математических моделей.

Связь между компонентами математических моделей системы управления осуществляется посредством синхронизации взаимодействия агрегатов-имитаторов, входящих в состав компонентов-моделей. Для построения компонентов динамической имитационной модели системы управления используется агрегатная система автоматизации моделирования, реализующая агрегатный способ имитации сложных систем, в связи с чем используется шесть типов агрегатов-имитаторов:

$ATOP_{ij}$  – агрегаты-имитаторы выполнения технологических операций;

$ASOB_i$  – агрегаты-имитаторы свершения  $i$ -го события в процессе имитации функционирования системы управления;

$AOBIN_r$  – агрегаты-имитаторы функционирования оборудования;

$AKAN_r$  и  $AOBOP_r$  – агрегаты-имитаторы совместного использования оборудования общего пользования с помощью выделенных каналов;

$APROC_k$  – процедуры-имитаторы с номером  $k$  ликвидации аварийной ситуации при выполнении имитационной модели.

Агрегаты-имитаторы  $AMTXO_{ij}$  представляют собой четырехполюсные агрегаты, которые имитируют выполнение технологической операции  $MTXO_{ij}$ . В режиме прямой имитации сигнал приходит от агрегата  $ASOB_i$ , который по соответствующим функциям распределения формирует значения параметров агрегата ( $\tau_{ijl}$ ;  $c_{ijl}$ ;  $\{V_{rij}\}$ ;  $\{mt_{ijl}\}$ ;  $\{ko_{ijl}\}$ ) в  $l$ -ой реализации имитационной модели системы управления. Затем каждый агрегат  $ATOP_{ij}$  определяет индивидуальные запросы на ресурсы и оборудование в виде списков запросов ( $SPINRS_{ijl}$ ;  $SPOBR_{ijl}$ ;  $SPISP_{ijl}$ ). Далее происходит обращение к системе распределения ресурсов, которая выделяет требуемые ресурсы на время имитации  $MTXO_{ij}$ .

Агрегаты  $ASOB_i$  являются многополюсными с различным числом входов и выходов. Выходы у  $ASOB_i$  могут быть одиночными и «кустовыми». Из «кустовых» выходов агрегата формируются сигналы двух типов: действительный  $Sg_d$ , разыгрываемый по вектору вероятностей  $\{P_{ijkl}\}$  и  $(k-1)$  фиктивных сигналов  $Sg_f$ . Выходы  $ASOB_i$  нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события  $i$  и номер входа  $r$  в агрегат  $ASOB_j$ . Только действительные сигналы  $Sg_d$ , поступающие в режиме прямой имитации на вход  $ATOP_{ij}$ , инициируют его работу по изложенному алгоритму. Фиктивные сигналы  $Sg_f$  обходят алгоритм выполнения  $ATOP_{ij}$ . При этом у агрегатов  $ASOB_j$  используется еще один тип выходных «кустовых» сигналов, называемых резервными выходами  $ASOB_j$ . С их помощью реализуется так называемое «технологическое резервирование».

Таким образом, на стадии автоматизации проектного моделирования систем управления эксперт-технолог имеет возможность динамического регулирования выполнения множества  $\{ATOP_{ij}\}$  в зависимости от текущей структуры системы управления с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания соответствующего количества их разветвлений. Окончательный вариант оптимизации структуры системы управления принимается на основе анализа статистической информации, собранной в процессе функционирования динамической имитационной модели.

### Заключение

Многочисленные попытки унификации системного подхода при решении конкретных задач привели к необходимости использования процедуры реструктуризации моделей в области

имитации для анализа функционирования сложных технических систем, представленных в качестве многопараметрических объектов конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы [3]. При этом сохраняется возможность выделить классы сложных технических систем со специфическими свойствами, на основании которых разрабатываются методологические принципы построения имитационных моделей, которые характеризуются единой математической терминологией и могут быть доступны специалистам различных предметных областей.

В качестве инструмента для реализации подобного подхода используются метод пошаговой реструктуризации имитационных моделей и динамическая имитация функционирования сложных технических объектов [4], на основе которых осуществляется синтез оптимальной структуры управления сложной технической системы в соответствии с решаемой многокритериальной задачей оптимизации ее функционирования.

В работе предложен новый подход к исследованию управляемых систем при автоматизации их проектного моделирования, основанный на адаптации структуры имитационной модели системы управления к условиям функционирования технологического цикла производства, который используется для решения многокритериальных задач оптимизации структуры управления.

Обоснована возможность использования данного метода для оценки качества проектного моделирования при построении оптимальной структуры системы управления технологическим циклом производства на основе реструктуризации имитационных моделей вероятностных технологических систем.

Новизна данного подхода состоит в адаптации текущей структуры имитационной модели системы управления к условиям функционирования вероятностного технологического процесса производства при решении многокритериальных задач оптимизации структуры управления. Предложенный метод позволяет выделить классы

управляемых систем со специфическими свойствами, которые характеризуются единой математической терминологией и могут иметь единые критерии оценки качества проектного моделирования для специалистов различных предметных областей.

Выделение классов управляемых систем со специфическими свойствами дает возможность разработки методологических принципов построения систем управления на стадии их проектного моделирования, а также основания рассчитывать на создание необходимой базы знаний, позволяющей работать с управляемыми системами любой степени сложности вне зависимости от их физической сущности и рамок формализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Максимей, И.В.* Разработка имитационных моделей сложных технических систем: монография / И.В. Максимей, В.С. Смородин, О.М. Демиденко. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 298 с.
2. *Смородин, В.С.* Метод анализа систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности / В.С. Смородин // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию ГГУ им. Ф. Скорины (Гомель, 17 июня 2015 г.): материалы в 4 ч. Ч. 4. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – С. 157–160.
3. *Смородин, В.С.* Интеллектуальный анализ систем управления потенциально опасными процессами производства / В.С. Смородин // Сборник трудов международной научной конференции им. Т.А. Таран: «Интеллектуальный анализ информации. ИАИ-2015». – Киев, 20–22 мая, 2015. – С. 212–219.
4. *Смородин, В.С.* Метод динамической имитации вероятностных производственных систем / В.С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2012. – № 2. – С. 96–101.

*Поступила в редакцию 08.02.16.*